

La Nebulosa de la PIPA

Observando las condiciones iniciales de la formación de estrellas

LA PIPA ES UNA NEBULOSA JOVEN –AÚN NO HA FORMADO ESTRELLAS-, Y CERCANA: EL OBJETO IDÓNEO PARA ESTUDIAR LOS PRIMEROS PASOS DE LA FORMACIÓN ESTELAR

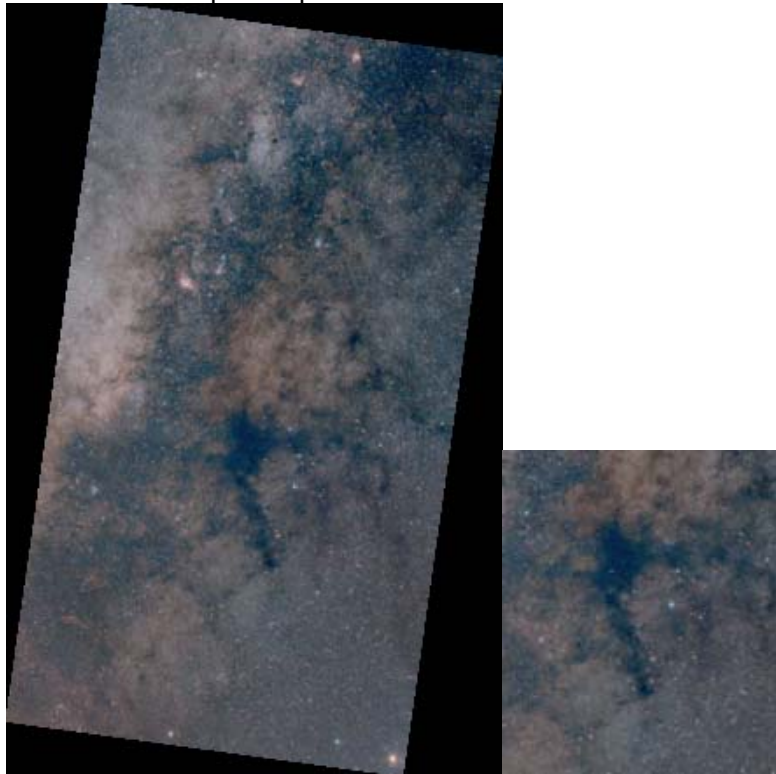
**Por Carlos Román
(Instituto de Astronomía UNAM, México)**

LAS ESTRELLAS SON EL PRINCIPAL OBJETO DE ESTUDIO DE LA ASTROFÍSICA. Prácticamente no hay procesos en el cosmos que no estén relacionados con ellas y, por ello, entender su origen tiene una importancia capital. Sin embargo, la formación de las estrellas todavía se considera un problema abierto, principalmente porque aún no se entienden por completo las llamadas condiciones iniciales del fenómeno. Estas condiciones iniciales o puntos de arranque deben conocerse en detalle antes de poder elaborar una teoría predictiva de la formación estelar, en la que podamos modelar exitosamente el nacimiento de las estrellas mediante la conjunción de observaciones, teorías y simulaciones numéricas.

Hablando de un modo general, se piensa que todas las estrellas tienen un origen similar. Las estrellas se forman a partir de condensaciones de gas en el interior de nubes gigantes de hidrógeno molecular. Estas condensaciones, llamadas núcleos densos, se hallan fuertemente oscurecidas por polvo de carbón y silicio -que actúa como aislante- y son por ello las regiones más frías (con temperaturas inferiores a 260 grados bajo cero) de las galaxias. El polvo, esencial para el proceso, es producto de explosiones de estrellas de generaciones previas y se distribuye de forma uniforme en las nubes moleculares, aunque contribuye usualmente con menos del dos por ciento de la masa total de la nube. Tras formarse, los núcleos densos continúan contrayéndose hasta alcanzar densidades críticas que provocan el colapso irreversible del núcleo y finalmente dan origen a las llamadas protoestrellas (una suerte de "embriones" estelares) que evolucionan hasta que la estrella nace. La conversión de un núcleo denso en estrella constituye un proceso en el que intervienen muchos procesos físicos complejos, y por ello algunas piezas del rompecabezas no se entienden por completo. Por ejemplo, ¿qué ocurre para que la nube pase de ser una entidad difusa en un estado mayoritariamente turbulento (y, por tanto, caótico) a una fase mucho más ordenada en los núcleos densos? O, ¿cómo interfieren en el proceso los campos magnéticos que se observan en las nubes? Tampoco entendemos completamente cómo la nube "sabe" cómo fraccionarse en grumos de tamaños exactos que terminan formando grupos de estrellas con una distribución de masas (la llamada función inicial de masa) que es prácticamente idéntica en cualquier nube de la galaxia.

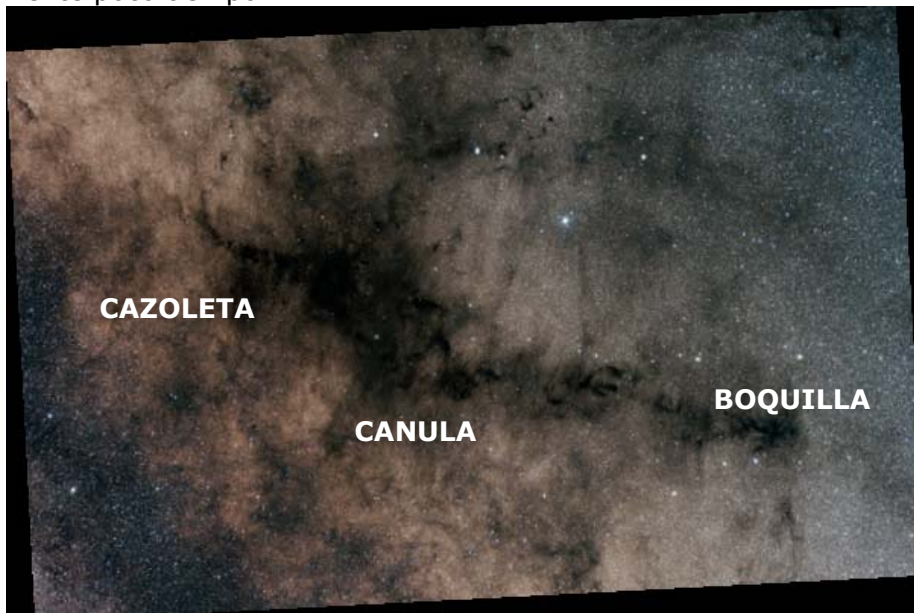
Algo de nuestra ignorancia proviene de la relativa novedad del estudio de la formación estelar en la astrofísica moderna. Debido a que la formación de las estrellas ocurre en zonas tan oscuras y frías, fue un proceso relativamente invisible a las observaciones telescópicas hasta la década de los años setenta del siglo

pasado, cuando se desarrollaron las tecnologías para hacer observaciones en el infrarrojo y el radio con las que se penetró finalmente en las tinieblas de las nubes



La Nebulosa de la Pipa, proyectada contra el bulbo galáctico en la región de Sagitario.
Fuente: Jaime Fernández.

moleculares. Tampoco se tuvo, hasta mediados del siglo pasado, un modelo teórico adecuado para explicar la formación de una estrella a partir de una nube de gas, y tampoco se logró simular en un ordenador la formación de una estrella hasta hace relativamente poco tiempo.



Acercamiento de la Nebulosa de la Pipa, indicando las partes de una pipa imaginaria, de acuerdo a la morfología de la nube. Fuente: ESO.

Por otra parte, debe considerarse el hecho de que el proceso de nacimiento de las estrellas es muy dinámico, y que las nubes evolucionan rápidamente cuando forman estrellas -ya que estas generan vientos y chorros que dispersan el gas-, cambiando sus propiedades de manera drástica. En casi todas las nubes

moleculares cercanas, el proceso de formación de las estrellas ya se ha iniciado y, por tanto, las estrellas jóvenes ya han alterado significativamente su entorno. Por ello es muy difícil deducir cuáles fueron las condiciones primordiales que derivaron en la etapa actual. A esto se suma la dificultad de observar las nubes con suficientemente detalle, debido a las enormes distancias a las que se encuentran.

La nube idónea

Se requiere, por tanto, observar una nube lo bastante joven como para que no haya formado estrellas aún y que se encuentre a una distancia relativamente corta para poder estudiarla en detalle. Sorprendentemente, esa nube estuvo ahí siempre, a disposición de los astrónomos, tan obvia en el cielo como muchas constelaciones, y sin embargo no se le dio mucha importancia hasta hace unos pocos años. Esta nube se conoce como Nebulosa de la Pipa, y su silueta característica se puede distinguir incluso a simple vista en una noche oscura, preferentemente en el cielo del Hemisferio Sur. La Pipa se encuentra en la constelación de Sagitario, proyectada contra el bulbo galáctico -cuajado de estrellas gigantes- y se encuentra a una distancia de ciento treinta pársecs, un poco más cercana que las nubes de Tauro y Ofiuco (mucho más conocidas y, curiosamente, similares a la Pipa en muchos aspectos). Su morfología es relativamente simple, y realmente similar a una pipa de fumar (ver imagen superior): presenta un largo filamento de unos once pársecs de largo, que conforma la cánula de la imaginaria pipa, que termina en una condensación amorfa relativamente más grande (la cazoleta de la pipa) y algunos filamentos más delgados hacia el noreste (como el humo que sale de la cazoleta). Incluso con imágenes ópticas se puede deducir que la nube contiene una gran cantidad de núcleos densos, la mayoría de los cuales no ha formado ninguna estrella aún (imagen página contigua). Solo en su extremo oeste (la boquilla de la pipa), se haya un núcleo muy denso, catalogado como Barnard 59, que ya ha formado un pequeño cúmulo de estrellas poco masivas. Condiciones como esta hacen de la Pipa un laboratorio cósmico ideal para estudiar las elusivas condiciones iniciales de la formación estelar.

Uno de los núcleos densos que se localiza en el "humo" de la Pipa, catalogado como Barnard 68 (B68), ha sido estudiado en detalle por considerarse el ejemplo más típico de un glóbulo de Bok. Se trata de un tipo especial de núcleo denso aislado, embebido en un medio ionizado. El perfil de densidad de B68 resultó ajustarse casi a la perfección con un modelo teórico de una esfera de gas de temperatura constante en equilibrio de presión con el medio local. Esto se considera como una fuerte evidencia de que las condensaciones de baja masa como B68 evolucionan de forma cuasiestática (es decir, cada cambio que experimentan las condensaciones se da en un estado de equilibrio), al menos en las etapas anteriores al colapso protoestelar. También se han estudiado la química y el movimiento del gas en el interior de B68, y se han obtenido interesantes resultados: debido al choque de gas de alta velocidad proveniente de alguna explosión estelar cercana, parece que el glóbulo gaseoso vibra como una campana, lo que apunta a un equilibrio muy débil en B68 que puede que no tarde en romperse.

Un mapa de color

Para comenzar un estudio de otros núcleos como B68 se procedió a hacer mapas de la nube completa. Un mapa de radio era la solución más obvia, y un grupo de astrónomos japoneses lo completó en 1999. Sin embargo, la calidad y resolución de los datos era muy pobre como para resolver los núcleos densos individuales. Aún así, el mapa de radio de la Pipa permitió deducir que el gas de la cazoleta tiene una velocidad radial un poco más alta que el de la cánula, formando una especie de anillo denso de gas. Este anillo muy posiblemente será la siguiente región de la nube en formar estrellas, después de B59.

Debido a que un mapa de radio con la calidad adecuada resultaba demasiado costoso para cualquiera de los radiotelescopios disponibles actualmente, se procedió a hacer un mapa de densidad del gas en la Pipa mediante una técnica llamada exceso de color, que hace uso del enrojecimiento por el polvo de la luz de las estrellas que se hallan detrás de la nube. El enrojecimiento de una estrella de fondo es proporcional a la cantidad de gas que hay entre el observador y la estrella. Se utilizaron datos del censo infrarrojo 2MASS, que permitieron medir el enrojecimiento que producen el gas y polvo de la Pipa en más de cuatro millones de estrellas gigantes del bulbo galáctico. Promediando los enrojecimientos individuales en regiones individuales de un minuto de arco de ancho, se elaboró al fin un mapa detallado de la nube, similar a un mapa de radio (salvo por la información sobre la velocidad del gas), que permitió resolver cerca de ciento cuarenta núcleos densos adicionales. El mapa 2MASS de la Pipa permitió determinar los radios y masas de todos esos núcleos y, más tarde, usando un radiotelescopio, se obtuvieron mediciones individuales de la velocidad radial del gas hacia cada uno de ellos (una opción más económica que el mapa completo).

Con todo ello, se logró deducir que los núcleos de la Pipa, con excepción del activo B59, son muy jóvenes, tal vez incluso más que B68, y que se encuentran en equilibrio

Debido al choque de gas procedente de una explosión cercana, parece que el glóbulo B68 vibra como una campana, lo que apunta a un equilibrio débil que puede que no tarde en romperse

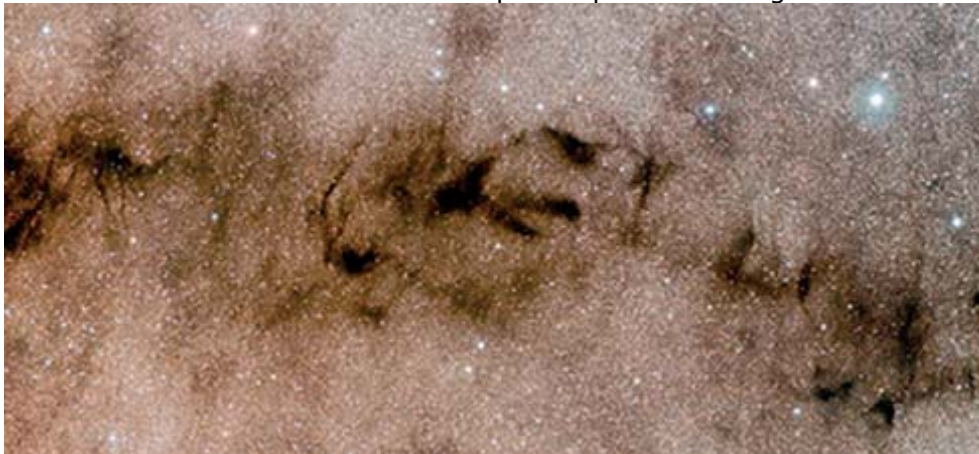
local con el medio gracias a la presión que ejerce sobre ellos la propia nube. También se descubrió que los núcleos de la Pipa no parecen seguir el comportamiento que se espera para un gas dominado por movimientos turbulentos y que, por el contrario, el gas dentro de los núcleos parece estar dominado por movimientos ordenados y coherentes. Así, en la escala de los núcleos densos, la turbulencia parece perder mucha de la importancia que tiene durante etapas más tempranas de la evolución de las nubes. Sin embargo, uno de los resultados más interesantes obtenidos del análisis del mapa 2MASS de la Pipa se refiere a la distribución de masas de los núcleos. Esta distribución, que indica cuántos núcleos de cada intervalo de masa hay en una nube es, estadísticamente hablando, idéntica a la distribución de masas de estrellas en cúmulos de estrellas jóvenes, como el Trapecio de Orión. Esto podría significar que la función inicial de masa de las estrellas que mencionamos anteriormente podría estar determinada en una etapa primordial de la nube. En pocas palabras, aquella distribución podría ser una de esas condiciones iniciales que estamos buscando.

Recientemente se incrementó la calidad del mapa 2MASS de la Pipa mediante un conjunto adicional de datos infrarrojos obtenidos con telescopios de 3,5 y ocho metros del Observatorio Europeo del Sur, en Chile, y con el telescopio de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto en Andalucía. Los datos de estos telescopios, aunque solo cubren las áreas más densas de la nube, superan en varios órdenes de magnitud la profundidad y la resolución del censo de 2MASS, y han permitido desarrollar varios estudios detallados. Por un lado se estudió la relación entre extinción y longitud de onda, lo que reveló que, aún cuando se incrementa considerablemente la densidad del gas en núcleos como B59, los granos de polvo absorben la luz de manera similar a como lo hacen en regiones menos densas. Combinando las medidas con datos del telescopio espacial Spitzer, se logró resolver

por fin la estructura del núcleo central en B59 que, a pesar de su gran masa, no formará más de una o dos estrellas nuevas.

Nuevos resultados

Otro trabajo de gran utilidad realizado con los nuevos datos infrarrojos de la Pipa es la creación de un nuevo conjunto de mapas con una resolución tres veces mejor en las regiones que contienen núcleos densos. Los nuevos mapas confirmaron que muchos de los núcleos detectados en el mapa de 2MASS contenían subestructura, es decir, que un porcentaje de ellos parece tener varios picos de densidad, en contraste con otros núcleos que tienen un solo pico de densidad. Se decidió entonces analizar las separaciones entre picos de densidad individuales y se descubrió algo muy interesante: a menor escala espacial, es decir, conforme hacemos un acercamiento a la nube, se observa que la cantidad de picos de densidad aumenta de manera lineal. Este patrón parece ser regular en un intervalo



Núcleos densos a lo largo de la cánula de la Pipa. Nótese el océano de estrellas al fondo de la región, en su mayoría estrellas gigantes del bulbo de la galaxia.



Comparación del área central del glóbulo B68. Arriba vemos una composición de datos del visible y del infrarrojo cercano; en la imagen inferior se han añadido datos en el infrarrojo que permiten observar las estrellas que se hallan detrás de la nube. Fuente: ESO.

que abarca desde escalas de pársecs (comparables con el tamaño de la nube) hasta escalas un poco más pequeñas que un décimo de pársec. Por debajo de este límite

la proporcionalidad se pierde y el número de picos de densidad ya no asciende, lo que parece indicar que hay una escala límite por debajo de la cual la nube ya no se fracciona. Las masas de los picos de densidad más pequeños podrían ser menores que uno o dos décimos de una masa solar.

La proporcionalidad en la distribución de separaciones entre núcleos densos es muy parecida a la que se había observado en las estrellas de baja masa que se formaron en los filamentos de la nube activa de Tauro. Más aún, las estrellas en la nube de Tauro forman pequeños grupos a lo largo y ancho de la nube y, cuando se hizo un mapa de la cantidad de núcleos densos de la Pipa por unidad de área en el mapa, se descubrió que los núcleos también formaban pequeños grupos, como lo hacen las estrellas en Tauro. Este resultado, junto con el de la distribución de separaciones, sugiere que la distribución espacial de los núcleos densos de la Pipa

¿Es acaso posible que muchos de los picos pequeños de densidad que forman subestructuras en núcleos grandes terminen uniéndose?

(el modo en el que se distribuyen en el área de la nube), es una versión temprana de la distribución espacial que tendrán las estrellas después de formarse.

La existencia de subestructura en los núcleos densos podría tener también consecuencias importantes a la hora de deducir cuál es el tamaño final que puede tener un núcleo que termine formando una estrella. Los picos de densidad más pequeños que se observan en los mapas de alta resolución podrían ser precursores de estrellas de muy baja masa, aunque, por otro lado, un reciente estudio numérico sobre B68 sugiere que un núcleo pequeño cercano a B68 podría unírsele y formar un núcleo más grande. ¿Es acaso posible que muchos de los picos pequeños de densidad que forman subestructuras en núcleos grandes terminen uniéndose? Responder a esta y otras preguntas requiere observaciones en alta resolución de más nubes como la Pipa.

Otro resultado reciente del estudio de la Nebulosa de la Pipa es la posible presencia de un campo magnético. Usando una lente polarizadora, se observaron estrellas en distintas regiones de la nube y se descubrió que las orientaciones de los vectores de polarización de las estrellas eran, en promedio, casi siempre perpendiculares al eje principal o cánula de la Pipa. Esto es lo que se esperaría de una nube en la que un campo magnético ayudó a dirigir el flujo del gas para formar las estructuras filamentosas de la nube. Este resultado sugiere fuertemente que la nube posee un campo magnético que abarca toda su extensión. El campo magnético, además, sería más intenso en la región de la cazoleta y tendría su menor intensidad en B59. El campo magnético incluso parecería estar relacionado con el estado evolutivo de los núcleos. Esto último se deduce de estudios de la química de varios núcleos densos, hechos con la antena de radio de IRAM, en Sierra Nevada.

La Nebulosa de la Pipa ha resultado ser una verdadera mina de diamantes para el estudio de las condiciones iniciales de la formación estelar. Los resultados obtenidos de su estudio en los últimos años ya han dado excelentes frutos científicos, y han abierto el apetito de muchos investigadores para estudios más complejos. Un ejemplo de ello es la prioridad que se dio a la observación de la Nebulosa de la Pipa en el infrarrojo lejano con el telescopio espacial Herschel, que comenzó a operar hace apenas algunos meses.

REFERENCIAS

- Alves, J. et al. 2007, A&A, 462, pp. L17
Alves, F. et al. 2008, A&A, 486, pp. L13
Lombardi, M. et al. 2006, A&A, 454, pp. 781
Onishi, T. et al. 1999, PASP, 51, pp.871
Román Zúñiga, C. et al. 2010, ApJ, 725, pp. 2232

Carlos Román (Instituto de Astronomía UNAM, México)

**Este artículo aparece en el número 33, febrero 2011,
de la revista "Información y Actualidad Astronómica",
del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)**